

21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书

量子色动力学专题

黄涛 王伟 等著



科学出版社



国家自然科学基金
理论物理专款资助

21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书

量子色动力学专题

黄 涛 王 伟 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书采用专题形式,对量子色动力学(QCD)基础和有效理论进行了深入介绍,包含 QCD 基本特点、格点 QCD、QCD 求和规则、手征微扰理论、重夸克有效理论、软共线有效理论和非相对论 QCD 等,还介绍了多种微扰 QCD 计算技巧、高能强子碰撞与重味夸克物理中的 QCD 效应以及热密 QCD 理论等。内容既衔接基础理论与相关研究前沿,又有一定的自洽性和相对独立性,是迅速系统掌握量子色动力学整体框架和最新进展所必备的参考书。

本书适合理论物理专业尤其是量子色动力学研究领域的研究生学习使用,也可作为这一研究领域的科研工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

量子色动力学专题/黄涛等著. —北京: 科学出版社, 2018.6

(21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书)

ISBN 978-7-03-057353-7

I. ①量… II. ①黄… III. ①量子色动力学—研究 IV. ①O572.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 093325 号

责任编辑: 钱 俊 / 责任校对: 彭珍珍 樊雅琼

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018 年 8 月第二次印刷 印张: 39 1/4

字数: 765 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



《21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》编委会
(第二届)

主 编: 孙昌璞

执行主编: 常 凯

编 委: (按姓氏拼音排序)

蔡荣根	段文晖	方 忠	冯世平
李 定	李树深	梁作堂	刘玉鑫
卢建新	罗民兴	马余刚	任中洲
王 炜	王建国	王玉鹏	向 涛
谢心澄	邢志忠	许甫荣	尤 力
张伟平	郑 杭	朱少平	朱世琳
庄鹏飞	邹冰松		

作者名单

(按姓氏笔划排序)

丁亨通	马滢青	王由凯	王 伟
王 青	王新年	申建明	吕才典
朱守华	吴兴刚	李湘楠	陈 莹
赵光达	郭新恒	黄 涛	

《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》

出版前言

物理学是研究物质及其运动规律的基础科学。其研究内容可以概括为两个方面：第一，在更高的能量标度和更小的时空尺度上，探索物质世界的深层次结构及其相互作用规律；第二，面对由大量个体组元构成的复杂体系，探索超越个体特性“演生”出来的有序和合作现象。这两个方面代表了两种基本的科学观——还原论（reductionism）和演生论（emergence）。前者把物质性质归结为其微观组元间的相互作用，旨在建立从微观出发的终极统一理论，是一代又一代物理学家的科学梦想；后者强调多体系统的整体有序和合作效应，把不同层次“演生”出来的规律当成自然界的基本规律加以探索。它涉及从固体系统到生命软凝聚态等各种多体系统，直接联系关乎日常生活的实际应用。

现代物理学通常从理论和实验两个角度探索以上的重大科学问题。利用科学实验方法，通过对自然界的主动观测，辅以理论模型或哲学上思考，先提出初步的科学理论假设，然后借助进一步的实验对此进行判定性检验。最后，据此用严格的数学语言精确、定量表达一般的科学规律，并由此预言更多新的、可以被实验再检验的物理效应。当现有的理论无法解释一批新的实验发现时，物理学就要面临前所未有的挑战，有可能产生重大突破，诞生新理论。新的理论在解释已有实验结果的同时，还将给出更一般的理论预言，引发新的实验研究。物理学研究这些内禀特征，决定了理论物理学作为一门独立学科存在的必要性以及在当代自然科学中的核心地位。

理论物理学立足于科学实验和观察，借助数学工具、逻辑推理和观念思辨，研究物质的时空存在形式及其相互作用规律，从中概括和归纳出具有普遍意义的基本理论。由此不仅可以描述和解释自然界已知的各种物理现象，而且还能够预言此前未知的物理效应。需要指出，理论物理学通过当代数学语言和思想框架，使得物理定律得到更为准确的描述。沿循这个规律，作为理论物理学最基础的部分，20 世纪初诞生的相对论和量子力学今天业已成为当代自然科学的两大支柱，奠定了理论物理学在现代科学中的核心地位。统计物理学基于概率统计和随机性的思想处理多粒子体系的运动，是二者的必要补充。量子规范场论从对称性的角度描述微观粒子的基本相互作用，为自然界四种基本相互作用的统一提供坚实的基础。

关于理论物理的重要作用和学科发展趋势，我们分六点简述。

1. 理论物理研究纵深且广泛, 其理论立足于全部实验的总和之上。由于物质结构是分层次的, 每个层次上都有自己的基本规律, 不同层次上的规律又是互相联系的。物质层次结构及其运动规律的基础性、多样性和复杂性不仅为理论物理学提供了丰富的研究对象, 而且对理论物理学家提出巨大的智力挑战, 激发出人类探索自然的强大动力。因此, 理论物理这种高度概括的综合性研究, 具有显著的多学科交叉与知识原创的特点。在理论物理中, 有的学科(诸如粒子物理、凝聚态物理等)与实验研究关系十分密切, 但还有一些更加基础的领域(如统计物理、引力理论和量子基础理论), 它们一时并不直接涉及实验。虽然物理学本身是一门实验科学, 但物理理论是立足于长时间全部实验总和之上, 而不是只针对个别实验。虽然理论正确与否必须落实到实验检验上, 但在物理学发展过程中, 有的阶段性理论研究和纯理论探索性研究, 开始不必过分强调具体的实验检验。其实, 产生重大科学突破甚至科学革命的广义相对论、规范场论和玻色-爱因斯坦凝聚就是这方面的典型例证, 它们从纯理论出发, 实验验证却等待了几十年, 甚至近百年。近百年前爱因斯坦广义相对论预言了一种以光速传播的时空波动——引力波。直到 2016 年 2 月, 美国科学家才宣布人类首次直接探测到引力波。引力波的预言是理论物理发展的里程碑, 它的观察发现将开创一个崭新的引力波天文学研究领域, 更深刻地揭示宇宙奥秘。

2. 面对当代实验科学日趋复杂的技术挑战和巨大经费需求, 理论物理对物理学的引领作用必不可少。第二次世界大战后, 基于大型加速器的粒子物理学开创了大科学工程的新时代, 也使得物理学发展面临经费需求的巨大挑战。因此, 伴随着实验和理论对物理学发展发挥的作用有了明显的差异变化, 理论物理高屋建瓴的指导作用日趋重要。在高能物理领域, 轻子和夸克只能有三代是纯理论的结果, 顶夸克和最近在大型强子对撞机(LHC)发现的 Higgs 粒子首先来自理论预言。当今高能物理实验基本上都是在理论指导下设计进行的, 没有理论上的动机和指导, 高能物理实验如同大海捞针, 无从下手。可以说, 每一个大型粒子对撞机和其他大型实验装置, 都与一个具体理论密切相关。天体宇宙学的观测更是如此。天文观测只会给出一些初步的宇宙信息, 但其物理解释必依赖于具体的理论模型。宇宙的演化只有一次, 其初态和末态迄今都是未知的。宇宙学的研究不能像通常的物理实验那样, 不可能为获得其演化的信息任意调整其初末态。因此, 仅仅基于观测, 不可能构造完全合理的宇宙模型。要对宇宙的演化有真正的了解, 建立自洽的宇宙学模型和理论, 就必须立足于粒子物理和广义相对论等物理理论。

3. 理论物理学本质上是一门交叉综合科学。大家知道, 量子力学作为 20 世纪的奠基性科学理论之一, 是人们理解微观世界运动规律的现代物理基础。它的建立, 带来了以激光、半导体和核能为代表的新技术革命, 深刻地影响了人类的物质、精神生活, 已成为社会经济发展的原动力之一。然而, 量子力学基础却存在诸

多的争议，哥本哈根学派对量子力学的“标准”诠释遭遇诸多挑战。不过这些学术争论不仅促进了量子理论自身发展，而且促使量子力学走向交叉科学领域，使得量子物理从观测解释阶段进入自主调控的新时代，从此量子世界从自在之物变成为我之物。近二十年来，理论物理学在综合交叉方面的重要进展是量子物理与信息计算科学的交叉，由此形成了以量子计算、量子通信和量子精密测量为主体的量子信息科学。它充分利用量子力学基本原理，基于独特的量子相干进行计算、编码、信息传输和精密测量，探索突破芯片极限、保证信息安全的新概念和新思路。统计物理学为理论物理研究开拓了跨度更大的交叉综合领域，如生物物理和软凝聚态物理。统计物理的思想和方法不断地被应用到各种新的领域，对其基本理论和自身发展提出了更高的要求。由于软物质是在自然界中存在的最广泛的复杂凝聚态物质，它处于固体和理想流体之间，与人们的日常生活及工业技术密切相关。例如，水是一种软凝聚态物质，其研究涉及的基础科学问题关乎人类社会今天面对的水资源危机。

4. 理论物理学在具体系统应用中实现创新发展，并在基本层次上回馈自身。从量子力学和统计物理对固体系统的具体应用开始，近半个世纪以来凝聚态物理学已发展成当代物理学最大的一个分支。它不仅是材料、信息和能源科学的基础，也与化学和生物等学科交叉与融合，而其中发现的新现象、新效应，都有可能导致凝聚态物理一个新的学科方向或领域的诞生，为理论物理研究展现了更加广阔的前景。一方面，凝聚态物理自身理论发展异常迅猛和广泛，描述半导体和金属的能带论和费米液体理论为电子学、计算机和信息等学科的发展奠定了理论基础；另一方面，从凝聚态理论研究提炼出来的普适的概念和方法，对包括高能物理在内的其他物理学科的发展也起到了重要的推动作用。BCS 超导理论中的自发对称破缺概念，被应用到描述电弱相互作用统一的 Yang-Mills 规范场论，导致了中间玻色子质量演生的 Higgs 机制，这是理论物理学发展的又一个重要里程碑。近二十年来，在凝聚态物理领域，有大量新型低维材料的合成和发现，有特殊功能的量子器件的设计和实现，有高温超导和拓扑绝缘体等大量新奇量子现象的展示。这些现象不能在以单体近似为前提的费米液体理论框架下得到解释，新的理论框架建立已迫在眉睫，如果成功将使凝聚态物理的基础及应用研究跨上一个新的历史台阶，也将理论物理的引领作用发挥到极致。

5. 理论物理的一个重要发展趋势是理论模型与强大的现代计算手段相结合。面对纷繁复杂的物质世界（如强关联物质和复杂系统），简单可解析求解的理论物理模型不足以涵盖复杂物质结构的全部特征，如非微扰和高度非线性。现代计算机的发明和快速发展提供了解决这些复杂问题的强大工具。辅以面向对象的科学计算方法（如第一原理计算、蒙特卡罗方法和精确对角化技术），复杂理论模型的近似求解将达到极高的精度，可以逐渐逼近真实的物质运动规律。因此，在解析手段

无法胜任解决复杂问题任务时，理论物理必须通过数值分析和模拟的办法，使得理论预言进一步定量化和精密化。这方面的研究导致了计算物理这一重要学科分支的形成，成为连接物理实验和理论模型必不可少的纽带。

6. 理论物理学将在国防安全等国家重大需求上发挥更多作用。大家知道，无论决胜第二次世界大战、冷战时代的战略平衡，还是中国国家战略地位提升，理论物理学在满足国家重大战略需求方面发挥了不可替代的作用。爱因斯坦、奥本海默、费米、彭桓武、于敏、周光召等理论物理学家也因此彪炳史册。与战略武器发展息息相关，第二次世界大战后开启了物理学大科学工程的新时代，基于大型加速器的重大科学发现反过来为理论物理学提供广阔的用武之地，如标准模型的建立。国防安全方面等国家重大需求往往会提出自由探索不易提出的基础科学问题，在对理论物理提出新挑战的同时，也为理论物理研究提供了源头创新的平台。因此，理论物理也要针对国民经济发展和国防安全方面等国家重大需求，凝练和发掘自己能够发挥关键作用的科学问题，在实践应用和理论原始创新方面取得重大突破。

为了全方位支持我国理论物理事业长足发展，1993 年国家自然科学基金委员会设立“理论物理专款”，并成立学术领导小组（首届组长是我国著名理论物理学家彭桓武先生）。多年来，这个学术领导小组凝聚了我国理论物理学家集体智慧，不断探索符合理论物理特点和发展规律的资助模式，培养理论物理优秀创新人才做出杰出的研究成果，对国民经济和科技战略决策提供指导和咨询。为了更全面地支持我国的理论物理事业，“理论物理专款”持续资助我们编辑出版这套《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》，目的是要系统全面介绍现代理论物理及其交叉领域的基本内容及其学科前沿发展，以及中国理论物理学家科学贡献和所取得的主要进展。希望这套丛书能帮助大学生、研究生、博士后、青年教师和研究人员全面了解理论物理学研究进展，培养对物理学研究的兴趣，迅速进入理论物理前沿研究领域，同时吸引更多的年轻人献身理论物理学事业，为我国的科学研究在国际上占有一席之地作出自己的贡献。

孙昌璞

中国科学院院士，发展中国家科学院院士

国家自然科学基金委员会“理论物理专款”学术领导小组组长

前 言

粒子物理中标准模型理论包含两部分：量子色动力学和弱-电磁相互作用统一模型理论。量子色动力学（简称 QCD）是 20 世纪 70 年代初发展起来的描述强相互作用的基本理论，它的基本成分是夸克与胶子，相互作用遵从色空间精确的 $SU(3)$ 规范对称性。由此它具有两个特点：渐近自由和夸克禁闭。对于高能散射过程，强子中的夸克犹如无相互作用的自由粒子，表现为强相互作用的渐近自由性质；渐近自由的特点决定了大动量迁移物理过程可较好地应用微扰理论计算。夸克禁闭，指低能强子中的夸克总被束缚在强子内部，以色单态成团出现，人们不能找到一个单独的带色夸克。夸克禁闭特点决定了低、中动量迁移物理过程中含有不可忽略的量子色动力学非微扰效应，这些非微扰效应影响了量子色动力学理论预言的精确程度，为人们理解强相互作用及相关问题带来了极大的困难。

自量子色动力学创立以来，人们已经将它应用到各种不同的物理现象和过程中，成功地经受了实验的检验，同时发展了新的方法和技巧，包括以格点量子色动力学、QCD 求和规则等为主的非微扰理论和方法；引入因子化定理保证了微扰理论可应用到一系列高能物理过程，部分微扰过程已经计算到次领头阶甚至次次领头阶，发展了重求和等技术处理可能破坏微扰展开收敛的大对数项；针对各种不同的强子系统，人们建立了量子色动力学的多种有效理论，如低能轻介子的手征有效理论等。这些方法和技巧发展迅速，且相对专业，不但初学者难以掌握，对于很多相近领域的专家也绝非易事。

目前我国研究生的课程学习虽已包含了量子场论与规范场论，但对量子色动力学新专题的学习则只能借助于综述性文献，阅读过程中难免存在专业知识背景、约定、统一性等多方面的问题，缺乏一本反映近期进展且适合初入门者的教科书。针对这一现象，本书作者选取了量子色动力学中的基础方法和有效理论进行了系统性的介绍，以专题形式撰写了相关章节，期望此书既能衔接基础理论课程与相关前沿研究，又能存在一定的自洽性和独立性，为研究生和青年学者了解量子色动力学整体框架与最新进展提供帮助。为了读者阅读方便，第 1 章介绍了量子色动力学的基本特点，其余共分五部分，第一部分为第 2~5 章，主要介绍了量子色动力学中的非微扰理论和方法，包含格点量子色动力学、手征微扰理论，QCD 求和规则等。第 6 和 7 两章侧重于介绍微扰 QCD 中所需要的基本方法：因子化定理可以将散射或衰变振幅因子化成微扰计算与非微扰参数化部分；重求和计算处理微扰计算中出现的大对数项，提高了微扰论的收敛性。第 8 章介绍了高能碰撞中 QCD

辐射修正效应。第 9 章介绍了 QCD 重整化理论中重整化能标设定问题的解决方案。第 11 章针对对撞机上重味物理理论和相关的进展进行了介绍。第 10 和 12 章依次介绍了目前流行的有效理论，重夸克有效理论可以处理包含一个重夸克的介子或重子；软共线有效理论则描述高速运动的粒子；当介子或重子全是由重夸克构成时，所有组分的运动都是非相对论的，人们发展了非相对论量子色动力学。最后一部分涉及有限温度 QCD 并介绍了 QCD 相变。由于作者和选题的局限性，本书并未包含所有量子色动力学专题的内容。作为已选的专题，读者除了具备量子场论的基础理论外，还需要了解量子色动力学基础和部分粒子物理的相关知识。

参与撰写本书的各位作者一直从事粒子物理与核物理理论的研究工作，并在各自的工作领域做出了有影响力的工作。各位作者基于自己多年的研究工作积累和对物理的深入理解，认真组织内容，经过两年的努力得以出版本书。希望本书的出版对于我国从事粒子物理尤其是量子色动力学研究领域的研究生、青年教师和科研人员有所帮助。

感谢科学出版社和《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》编委的热情帮助和鼓励。在撰写过程中，我们还得到了贾宇、钟涛等的帮助，此处一并致谢。

由于作者水平有限，而且参与撰写的人员较多，书中不妥之处在所难免，诚请各位同行专家和读者能够提出宝贵意见，以便今后进一步完善。

作者谨识

2017 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 量子色动力学 (QCD) 的基本特点	黄 涛
1.1 量子色动力学的实验基础	1
1.1.1 核力和强子	1
1.1.2 强子谱分类和夸克	3
1.1.3 深度非弹性散射实验中标度无关性规律	4
1.1.4 夸克“色”自由度存在的实验证据	6
1.2 $SU(3)$ 规范对称性和 QCD 拉氏密度	7
1.2.1 规范变换不变性原理	8
1.2.2 $SU(3)$ 群	9
1.2.3 QCD 拉氏函数	12
1.2.4 手征对称性	14
1.3 QCD 量子化和 Feynman 规则	15
1.3.1 QCD 量子化	15
1.3.2 QCD Feynman 规则	19
1.4 单圈图近似 $\beta(g)$ 函数和渐近自由	29
1.4.1 维数正规化和单圈图重整化	30
1.4.2 重整化常数和抵消项	33
1.4.3 渐近自由	35
1.4.4 重整化群方程	37
1.5 微扰 QCD	41
1.6 夸克禁闭	49
1.6.1 禁闭在强子内部的夸克和胶子	49
1.6.2 强子内夸克和胶子的几率分布	51
1.6.3 重夸克偶素和禁闭势	55
1.6.4 夸克禁闭和非微扰效应	57
参考文献	58
第 2 章 格点 QCD	陈 莹
2.1 格点 QCD 简介	62
2.1.1 时空格点上的规范对称性和规范不变量	63

2.1.2	规范场的格点作用量	65
2.1.3	夸克场的格点实现	67
2.1.4	Wilson 费米子作用量	69
2.1.5	Wilson 费米子的对称性	71
2.1.6	格点上的手征对称性	72
2.1.7	连续极限	73
2.1.8	格点 QCD 的物理观测量和计算方案	75
2.1.9	系统误差来源	78
2.1.10	作用量改进方案	80
2.2	蒙特卡罗数值模拟方法	81
2.2.1	蒙特卡罗模拟	83
2.2.2	马尔可夫过程	84
2.2.3	Metropolis 算法	85
2.2.4	纯规范场组态的更新算法	86
2.2.5	包含夸克场的格点 QCD 的蒙特卡罗模拟	87
2.2.6	淬火近似和 full-QCD 计算	90
2.3	强子谱的格点 QCD 计算	90
2.3.1	强子谱学格点 QCD 研究的一般方案	91
2.3.2	轻强子质量谱	97
2.3.3	重夸克势和色禁闭	99
2.3.4	标准模型基本参数 —— 强耦合常数和流夸克质量	103
2.3.5	三点函数和强子矩阵元	105
2.3.6	CKM 矩阵元的相关格点 QCD 计算	108
2.4	强子-强子相互作用	109
2.4.1	格点上单粒子的有限体积效应	110
2.4.2	格点上的两粒子相互作用	111
2.4.3	Lüscher 有限体积方法	113
2.4.4	可能的强子-强子束缚态的格点 QCD 研究	117
2.4.5	ρ 共振态的格点 QCD 研究	119
	参考文献	122
第 3 章	QCD 的手征对称性和手征微扰论	王 青
3.1	QCD 的手征对称性与手征反常	124
3.2	赝标介子的手征有效拉氏量与手征微扰理论	137
3.3	赝标介子手征有效拉氏量与 QCD 的关系	160
3.4	其他低能强子的手征有效拉氏量	179

参考文献	192
第 4 章 QCD 的大 N_c 展开	王 青
4.1 QCD 大 N_c 展开的 Feynman 图及路径积分分析	194
4.2 介子的大 N_c 展开	201
4.3 重子与核子的大 N_c 展开	208
4.4 QCD 的圈动力学与大 N_c 展开	216
参考文献	222
第 5 章 QCD 真空凝聚和背景场方法	黄 涛
5.1 QCD 真空凝聚	223
5.1.1 非零真空平均值	223
5.1.2 QCD 真空凝聚	226
5.2 背景场中 QCD 等效拉氏函数和 Feynman 规则	230
5.2.1 背景场中 QCD 等效拉氏函数	230
5.2.2 背景场中 QCD Feynman 规则	232
5.3 背景场中的夸克传播子和胶子传播子	234
5.3.1 固定点规范	234
5.3.2 背景场中的夸克传播子	236
5.3.3 背景场中的胶子传播子	245
5.4 真空凝聚参量	249
5.4.1 几个常用的量纲 $d \leq 6$ 真空凝聚参量	249
5.4.2 与凝聚参量 $\langle \bar{\psi}\psi \rangle^2$ 相关的几个公式	251
5.4.3 非零点真空凝聚参量	253
5.5 QCD 求和规则	259
5.6 强子分布振幅和它们的矩	267
5.6.1 强子价夸克分布振幅 $\phi(x_i, Q)$	267
5.6.2 Brodsky-Lepage 演化方程	270
5.6.3 分布振幅的矩	274
5.7 应用背景场方法计算介子分布振幅的矩	275
5.7.1 定义两点关联函数	275
5.7.2 背景场方法计算关联函数	278
5.7.3 强子唯象层次计算关联函数	281
5.7.4 应用 Borel 变换	282
5.7.5 数值计算 $\langle \xi^n \rangle_\mu$ 结果	283
5.7.6 分布振幅模型	284
参考文献	286

第 6 章	QCD 因子化	李湘楠
6.1	红外发散与红外安全	289
6.2	深度非弹性散射与共线因子化	293
6.3	重整化群与因子化定理的应用	303
6.4	k_T 因子化	308
	参考文献	313
第 7 章	QCD 重求和	李湘楠
7.1	重求和基本技巧	316
7.2	阈重求和与 DGLAP 方程式	323
7.3	k_T 重求和与 BFKL 方程式	330
7.4	联合重求和与 CCFM 方程式	334
	参考文献	337
第 8 章	高能碰撞中的 QCD 效应	王由凯, 朱守华
8.1	简介	338
8.2	例子: 标准模型 Higgs 粒子的产生、衰变与 QCD 效应	339
8.3	实验数据与理论预言直接对比的困难	341
8.4	微扰 QCD 过程	343
8.4.1	因子化定理	343
8.4.2	红外安全	345
8.4.3	固定阶计算	345
8.4.4	一圈图计算的程序实现	351
8.4.5	簇射	354
8.5	软 QCD 过程	357
8.6	蒙特卡罗事例产生子	358
8.6.1	利用马尔可夫链对微扰过程的模拟	358
8.6.2	匹配问题	360
8.6.3	强子化的弦模型	360
8.6.4	强子化团簇模型	363
8.7	小结	364
	参考文献	364
第 9 章	QCD 重整化能标的设定	吴兴刚, 申建明
9.1	微扰 QCD 展开与重整化能标的设定问题	366
9.2	重整化能标设定方案需满足的自洽条件	367
9.3	几种典型的重重整化能标设定方案	371
9.3.1	FAC 方案	371

9.3.2	BLM 方案	373
9.3.3	PMS 方案	385
9.3.4	PMC 方案	392
9.4	基于重整化群不变性的讨论	399
9.5	PMC 应用举例	402
9.5.1	正负电子湮灭比值 $R_{e^+e^-}(Q)$	403
9.5.2	Z^0 玻色子衰变到强子的高阶微扰修正	405
9.5.3	Tevatron 强子对撞机上顶夸克对的产生	408
9.5.4	重夸克和轻子的角分布	412
	参考文献	416
第 10 章	重夸克对称性和重夸克有效理论	郭新恒
10.1	重夸克对称性和重夸克有效理论的基本思想	418
10.2	$m_Q \rightarrow \infty (m_Q \gg \Lambda_{\text{QCD}})$ 时的重夸克有效理论	420
10.2.1	重夸克有效理论的拉氏量	420
10.2.2	重夸克味道和自旋对称性 $SU(2)_f \times SU(2)_s$	421
10.2.3	重夸克极限下重味强子弱衰变的跃迁矩阵元	423
10.3	重夸克有效理论的 $1/m_Q$ 高阶修正	427
10.3.1	计算有效理论的一般步骤	427
10.3.2	包含 $1/m_Q$ 展开的一阶修正的重夸克有效理论的推导	430
10.4	重味强子的质量谱	434
10.5	考虑 $1/m_Q$ 高阶修正的重味强子跃迁矩阵元	438
10.6	重夸克有效理论的重整化和辐射修正	442
10.6.1	重夸克有效理论的重整化	442
10.6.2	重夸克有效理论和 QCD 的匹配	445
10.6.3	几个关于算符辐射修正的例子	447
	参考文献	453
第 11 章	重味物理和 QCD	吕才典
11.1	重味物理中的 CP 破坏	455
11.1.1	中性 B 介子系统	458
11.1.2	弱衰变的 CP 破坏的分类	461
11.2	B 介子非轻子衰变的 QCD 计算方法简介	467
11.2.1	b 夸克衰变的有效哈密顿量	468
11.2.2	朴素和推广的因子化方法	471
11.3	QCD 因子化方法	474
11.3.1	辐射修正	476

11.3.2	$1/m_b$ 幂次修正	478
11.4	微扰 QCD 因子化方法	481
11.4.1	$B \rightarrow \gamma l \bar{\nu}$ 衰变的因子化证明	483
11.4.2	$B \rightarrow \pi$ 形状因子	489
11.4.3	B 介子两体非轻衰变	493
11.5	小结	497
	参考文献	498
第 12 章	软共线有效理论	王 伟
12.1	大能量有效理论中的重到轻形状因子	499
12.2	动量积分区域展开	502
12.2.1	二维标量粒子的自能修正	502
12.2.2	Sudakov 因子: 无质量粒子的顶点修正	505
12.2.3	有质量粒子的顶点修正	508
12.3	标量粒子的软共线有效理论	510
12.3.1	标量粒子的拉氏量	510
12.3.2	有效理论拉氏量与流算符的匹配	511
12.3.3	六维时空中的 Sudakov 因子	515
12.4	量子色动力学与软共线有效理论	519
12.4.1	幂次分析	519
12.4.2	有效拉氏量	520
12.4.3	软共线相互作用	521
12.4.4	Wilson 线与规范不变性	522
12.4.5	软共线退耦与因子化定理	523
12.4.6	共线反常情况下的因子化	525
12.5	软共线有效理论的一些应用	526
12.5.1	$B \rightarrow D\pi$ 因子化	526
12.5.2	重到轻形状因子分析	529
12.5.3	Sudakov 因子重求和	532
	参考文献	535
第 13 章	NRQCD 与重夸克偶素物理	马滢青, 赵光达
13.1	重夸克偶素及其性质	538
13.2	NRQCD 有效理论	541
13.2.1	Foldy-Wouthuysen-Tani 变换	541
13.2.2	NRQCD 拉氏量	542
13.2.3	速度标度率	544